

# 自己結合型センサを利用した変位と速度の同時測定に関する研究

Study on Simultaneous Measurement of Displacement and Velocity by using Self-Coupling Sensor

矢野川 功<sup>†</sup>, 津田 紀生<sup>††</sup>, 山田 諄<sup>††</sup>

Isao Yanogawa, Norio Tsuda, Jun Yamada

**Abstract** Recently, a demand for simultaneous measurement of displacement and velocity in the manufacturing process is increasing. Then, we have studied on a laser sensor which can measure displacement and velocity simultaneously by using the self-coupling effect of a semiconductor laser. This sensor is compact and low cost as the sensor head consists of only a semiconductor laser and a lens. The laser driver and receiver circuits are designed on the basis of data of two type VCSEL selected. It is confirmed that the laser sensor can measure displacement up to several tens centimeter and velocity up to 1m/s simultaneously. The error is under 1% in displacement measurement and is about 2% in velocity measurement.

## 1. はじめに

近年、工場の生産ラインではファブリペロー型（以下 FP）半導体レーザ（以下 LD）を利用したセンサによる測定が一般的になりつつある。FP を利用した測定には、マイケルソン干渉計など外部干渉計を用いた距離測定や、工業的に良く用いられる三角測量法による距離測定、レーザドップラメータによる速度測定などがある。<sup>1)</sup> しかし、外部干渉計は振動に弱く、測定装置が光学系によって大型化してしまう。三角測量法ではターゲットとなる物体の反射特性が悪い場合測定が行えない。レーザドップラメータによる速度測定では測定に時間がかかる等の短所がある。しかし、LD の自己結合効果を利用した測定では、フォトダイオード（以下 PD）内蔵型の LD の場合、LD のみで発光、干渉、受光を兼ねるため振動に強く、外部干渉光学系が大幅に簡略化できることで測定装置の小型化が可能になる。<sup>2)</sup> 距離センサでは測定範囲約 1m、誤差約 1%、振動は数 nm まで測定ができていた<sup>3)</sup>。

現在、工場の生産ラインにおいて測定のためのセンサは別々に設置されていることがほとんどである。そこで、LD を利用した測定を一つのレーザデバイスで行うこと

ができれば、より小型で安価な測定機器の開発ができる。そのため、変位と速度の同時測定を行う自己結合型センサの開発を行った。

本研究では、VCSEL タイプの LD の自己結合効果を利用して変位と速度の同時測定を行う。他の半導体レーザと比較して、小型・軽量という利点だけでなく、高利得・高効率であることや、注入電流によりレーザ光の周波数や出力を制御でき、変調が可能であるといった特徴がある。

## 2. 測定原理

### 2-1. 自己結合効果

自己結合効果の原理図を図 1 に示す。図より、LD から出力された光がターゲットとなる物体に当たると散乱し、その一部の散乱光が再び LD に戻ってくる。この時、出力光と戻り光が半波長の整数倍という共振条件を満たす場合、光出力がわずかに増加する。この現象を自己結合効果という。本研究ではこの現象を利用して変位と速度の同時測定を行った。

### 2-2. 自己結合効果を用いた変位測定の原理

自己結合効果を用いた変位測定の原理を図 2 に示す。LD の注入電流を、一定の割合で変化させると、LD の発振波長も一定の割合で変化する。そこで LD に流す電流を三角波変調することで、発振波長を微小に変化させた。

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院 工学研究科  
電気電子工学専攻（豊田市）

<sup>††</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科  
電子情報工学専攻（豊田市）

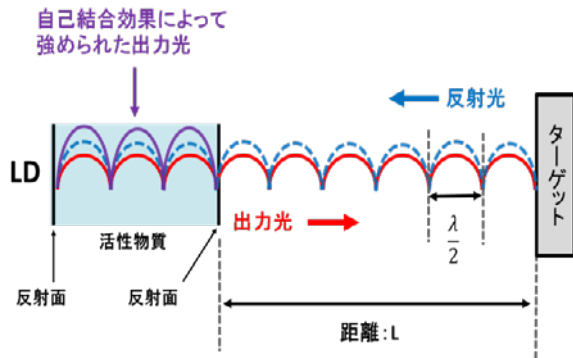


図1 自己結合効果の原理図

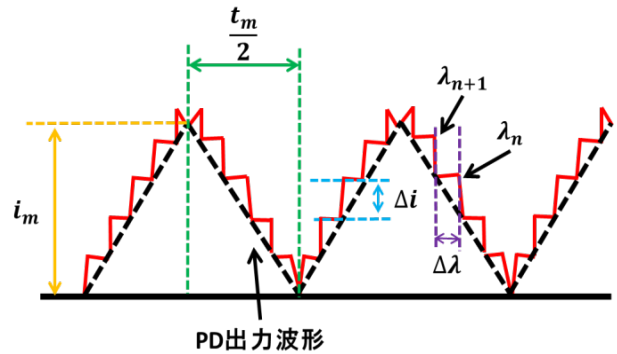


図3 三角波変調時のPDの出力波形

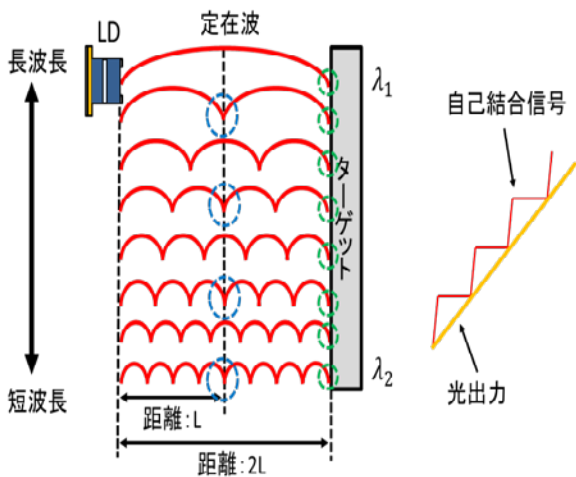


図2 三角波で発振波長を変化させたときの模式図

図2より、距離Lの時は共振条件を満たす波長が4つなのに対して、倍の距離2Lでは8つになることがわかる。つまり、LDとターゲットとの距離が離れば自己結合効果によるピークの発生回数が増加する。光出力の上の自己結合信号をモードホップパルス（以下MHP）と表記する。

### 2-3. 変位測定の計算方法

図3はPDの出力波形である。三角波変調がかかっているため、振幅 $i_m$ は破線で示した三角波となる。共振条件を満たした場合、PDの出力波形は図3の赤色の実線部分のように間隔の等しい階段状の波形となる。LDの注入電流に対する発振波長の傾きを図4に示す。注入電流と発振波長間に直線的な比例関係があると仮定する。この時の変調電流の振幅を $i_m$ とすると、共振条件を満たす隣り合う自己結合効果波形との信号間におけるLDの発振波長差 $\Delta\lambda$ は、(1)式に示すようになる。

$$\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n+1} = \frac{2L}{n(n+1)} \quad (1)$$

距離Lは波長λに比べると十分大きい（1）式より、nは1より十分に大きい値となる。そのため、（1）式は（2）式のように近似することができる。

$$\Delta\lambda = \frac{2L}{n^2} \quad (2)$$

また、ここで変調効率（3）式で表す。

$$\frac{d\lambda}{di} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta i} \quad (3)$$

（2）式を（3）式に代入すると（4）式となる。

$$\frac{d\lambda}{di} \Delta i = \frac{2L}{n^2} \quad (4)$$

自己結合効果の信号の個数をN、MHP周波数をFとすると（5）式が得られる。

$$N = \frac{i_m}{\Delta i} = F \times \frac{t_m}{2} \quad (5)$$

ここで、（4）式の $\Delta i$ を（5）式に代入すると（6）式となる。

$$N = \frac{n^2}{2L} = i_m \times \frac{d\lambda}{di} \quad (6)$$

また、 $f_m = 1/t_m$ （ $f_m$ は変調波の周波数）より（7）式となる。

$$F = \frac{i_m}{\Delta i} \times \frac{2}{t_m} = f_m \times i_m \times \frac{n^2}{L} \frac{d\lambda}{di} \quad \text{—— (7)}$$

共振条件より、 $n = 2L/\lambda$ となるので、代入し式変形すると (8) 式となる。

$$F = 4 \times f_m \times i_m \times \frac{1}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{di} \quad \text{—— (8)}$$

(8) 式より、MHP 周波数  $F$  は三角波変調の周波数  $f_m$ 、及び変調振幅  $i_m$ 、LD の発振波長  $\lambda$ 、発振波長の傾き  $d\lambda/di$ 、LD とターゲット間の距離  $L$  に比例していることがわかる。

## 2-4. 自己結合効果を用いた速度測定の原理

速度測定の原理を図 5、図 6 に示す。速度測定は、ターゲットが動いている場合、三角波の立ち上がり部分と、立下り部分に MHP の差が発生することを利用した。

変位測定の場合、三角波の立ち上がり部分と立下り部分の和の周波数を測定することで距離を求めることができる。ここで、図 5 のようにターゲットが静止している場合は、立ち上がり部分も、立下り部分でも同じ周波数になる。

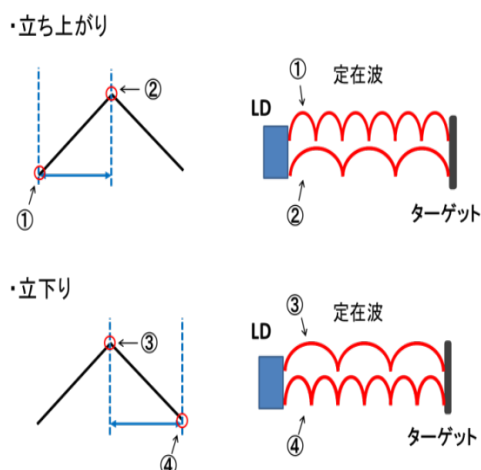


図 5 ターゲットが静止している場合の MHP

図 5 より、ターゲットが静止している場合、立ち上がり部分において、立ち上がりの最初の部分①での定在波数と、立ち上がりの最後の部分②での定在波数は、電流値が①よりも②の方が大きいため、②での定在波の波長が①よりも長くなることで定在波の数に差が生まれる。

立下り部分では、立ち上がりとは逆に、電流値の大きい③から電流値の小さい④に推移するため、④の定在波の波長が③よりも短くなり、定在波の数に差が生まれる。

変位測定では、定在波の数の差を立ち上がり又は立下り時間で割ったものを MHP として測定に利用しているため、ターゲットが静止している場合には立ち上がり部分と立下り部分は同じ MHP 周波数となる。

次に、ターゲットが移動している場合を図 6 に示す。図 6 の光出力の立ち上がり部分では、ターゲットが移動したことで、立ち上がりの最初の部分①の定在波に対して、立下りの最後の部分②の定在波数が増加することで、①に対する②の定在波数が減少する。その結果、移動速度の上昇に伴い MHP 周波数が低下する。

次に、図 6 の光出力の立下りの部分では、ターゲットが移動したことで、立下りの最初の部分③の定在波に対して、立下りの最後の部分④の定在波が増加することで、③に対する④の定在波数が増加する。その結果、移動速度の上昇に伴い MHP 周波数が上昇する。

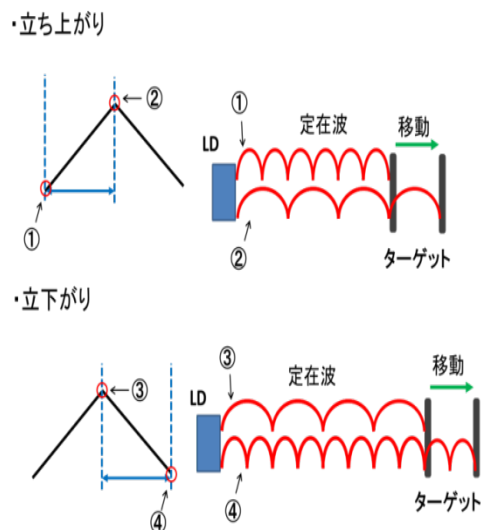


図 6 ターゲットが移動している場合の MHP

## 3. 測定装置

### 3-1. 測定装置概要

VCSEL は FP タイプの LD と比べて、閾値が低く、単一縦モード特性が良く、また安定して単一縦モード特性を維持できる。そこで LD は、VCSEL タイプの LD を使用した。

測定装置概略図を図 7 に示す。測定装置はセンサ部と回路部から構成され、回路部は投光回路と受光回路から構成される。

センサ部は、VCSEL をシリンダー内に設置した。シリンダーは直径 3cm、全長 4cm～5.5cm まで調整できるものを使用した。シリンダーに取り付けたレンズは直径 20mm 焦点距離 30mm の物を使用した。

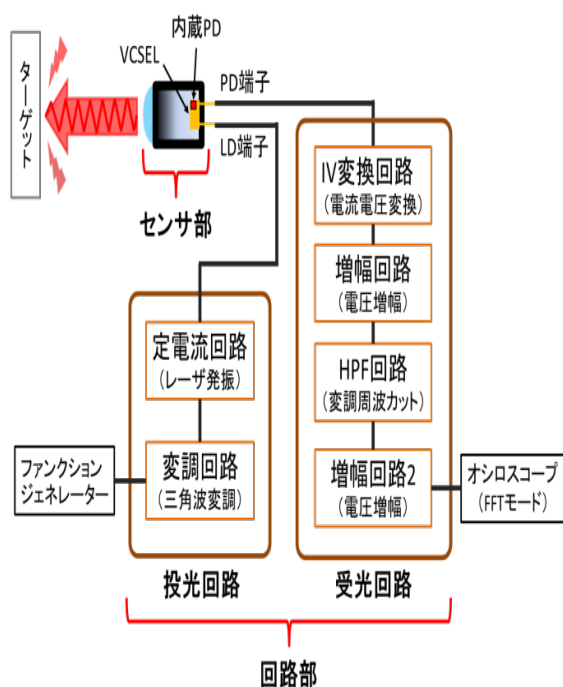


図7 測定装置概略図

VCSELはLITRAX社製LX-VCS-850-C101（発振波長850nm、光出力1mW）RayCan社製RC12xxx1-T15m（発振波長850nm、光出力0.5mW）の2つを使用して、比較を行った。以降、LX-VCS-850-C101をC101、RC12xxx1-T15mをRayCanと表記する。

回路部の働きは、まずLD端子に接続された定電流回路によってレーザ発振させ、ファンクションジェネレータ（以下FG）から三角波を出力し、変調回路を通し、レーザ光に三角波変調をかける。レーザ光がターゲットに当たり、散乱したレーザ光の一部がレーザの活性領域に戻ってくる。

このとき、VCSELの内蔵PDで反射してきた光を光起電流として検出する。この光起電流の中に自己結合効果によって増加した光出力の信号が含まれている。PDで検出した信号をIV変換回路で光起電流から電圧へ変換する。この時の電圧は数十mV～数百mV程度の大きさしかないので、増幅回路で数Vの電圧まで増幅する。

検出した信号には自己結合信号以外に三角波変調の信号が含まれている。よって、ハイパスフィルター（以下HPF）で三角波の信号をカットして自己結合信号のみを取り出し、増幅回路2で自己結合信号を増幅し、オシロスコープのFFTモードで測定を行った。

### 3-2. ターゲット概要

ターゲットには、アルミニウム板を切り出して作った

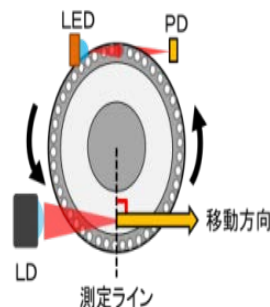
円盤（直径12cm、厚さ3mm）に白い紙を貼ったものを使用した。また、円盤には48個の穴を開けており、LEDとPDを円盤を挟む形で設置することで周期的な信号を作り速度測定の際の基準としている。円盤の移動速度は(9)式で求めることができる。

$$\text{円盤の移動速度} = \text{円盤のレーザ焦点上の半径} \times \frac{2\pi}{\text{円盤の穴の数}} \times \frac{1}{\text{PDで測定した信号の周期}} \quad (9)$$

レーザ光の集光位置と測定ラインの関係を図8に示す。測定の際、円盤の測定ライン上にレーザ光を当てることで、円盤の回転速度を移動速度として測定した。今回の測定システムでは、集光位置が測定ラインから外れると、レーザ光軸方向の正確な移動速度が得られない。

#### ・測定ライン上に集光した場合

測定ラインに対して垂直に移動する回転が逆の場合には、移動方向が左右逆転する。



#### ・測定ライン以外に集光した場合

円盤の回転方向の力を受けるので測定ラインに対して斜めに移動していることになる。

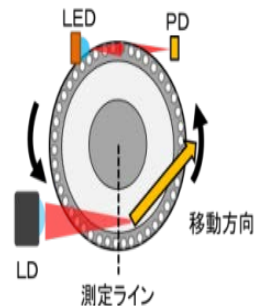


図8 レーザ光と集光ライン

## 4. 測定結果

図9、図10にC101とRayCanの注入電流を変化させたときの、発振波長の傾きのグラフを示す。発振波長の傾きは恒温槽を使い温度を25℃に保った状態で、光スペクトラムアナライザを使ってC101とRayCanの値を測定したものである。

図より、C101とRayCanの発振波長の傾きを比較すると、RayCanの傾きがC101の3倍ほどあることが分かる。

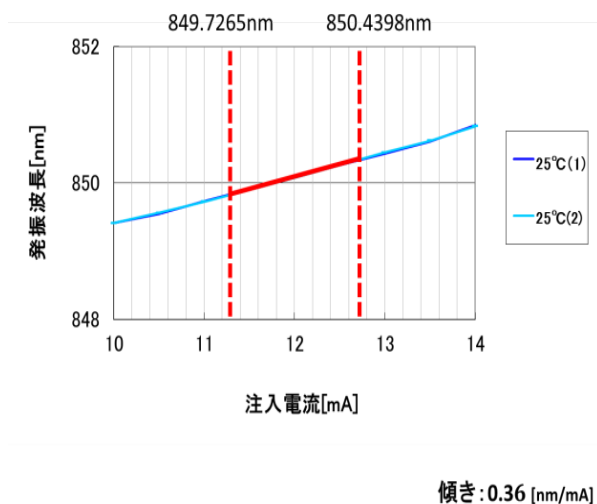


図 9 C101 の発振波長の傾き

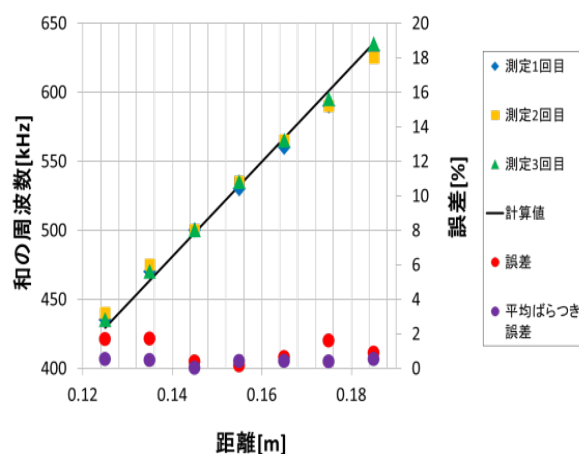


図 11 C101 の変位測定結果

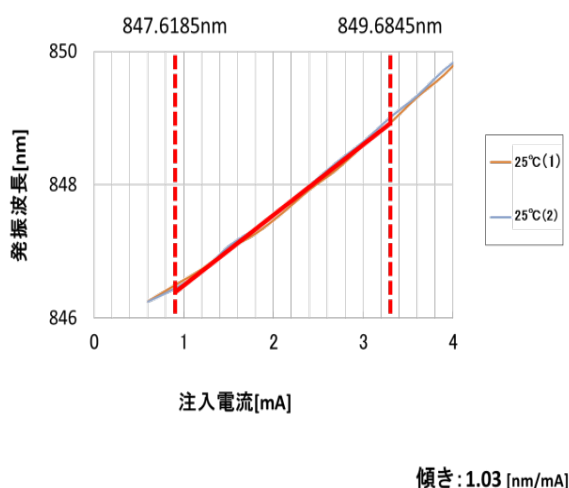


図 10 RayCan の発振波長の傾き

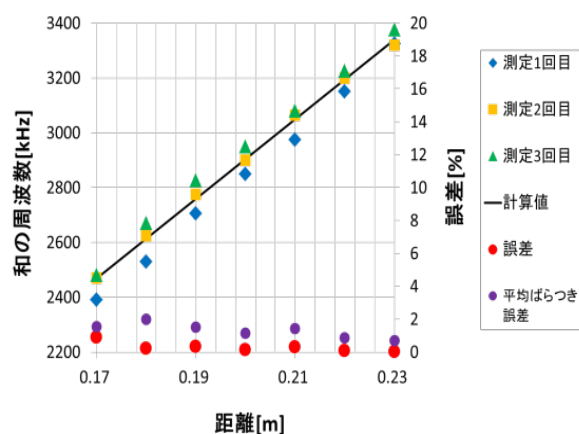


図 12 RayCan の変位測定結果

変位測定の結果を図 11、図 12 に速度測定の測定結果を図 13、図 14 に示す。

測定は集光距離を 19cm に固定して、C101、RayCan 共に 3 回測定した。変位測定の範囲は、C101 では 12.5cm～18.5cm、RayCan では 17cm～23cm、速度測定の範囲は C101 では 0～0.13 [m/s]、RayCan では 0～0.65 [m/s]である。

ここで、計算値を真の値とし、3 回測定した測定値の平均からの差を誤差とした。計算値は、また、平均した測定値を真の値とし、真の値から各測定値の誤差を平均ばらつき誤差とした。

図 11、図 12 の結果より、変位測定の平均誤差は、C101: 1%、RayCan: 0.28% となった。平均ばらつき誤差は、C101: 0.39%、RayCan: 1.32% となった。

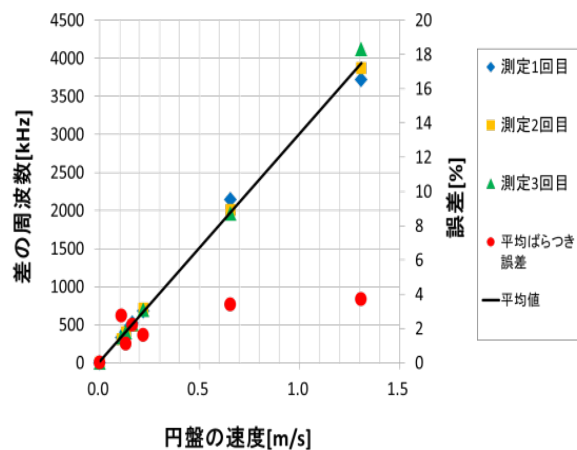


図 13 C101 の速度測定結果



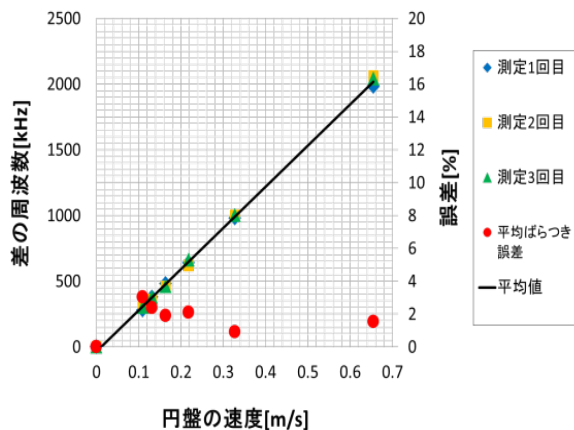


図 14 RayCan の速度測定結果

図 13、図 14 の結果より、速度測定の平均ばらつき誤差は、C101 : 2.1%、RayCan : 1.7%となった。

変位測定の誤差は、RayCan の方が C101 より約 3.5 倍小さく、平均ばらつき誤差は C101 のほうが RayCan よりも 3 倍ほどよくなった。これは、C101 より RayCan の方が発振波長の傾きが 3 倍ほど大きいため、定在波の数が増えることで MHP 周波数が高くなり、分解能が良くなった結果、誤差が小さくなったと考えられる。

平均ばらつき誤差は、RayCan より C101 の方が、光出力が 2 倍ほど大きいため、平均ばらつき誤差が小さくなったと考えられる。

速度測定は、変位測定に比べて誤差が大きくなった。これは、変位測定には MHP の和の周波数の平均を測定しているのに対して、速度の測定には立ち上がりとしち下りの MHP の差の周波数をとっていたため、それぞれの測定誤差が合わさって大きな誤差になってしまうと考えられる。

## 5. まとめ

LD の自己結合効果を利用して変位と速度の同時測定

を行った。半導体レーザには VCSEL タイプの C101 と RayCan を使用し、その 2 つの特性から投光回路と受光回路を設計した。測定の結果は、変位測定は、C101 が、測定範囲 12cm~19cm、平均誤差 1%、平均ばらつき誤差 : 0.39%、RayCan が測定範囲 17cm~23cm、平均誤差 0.28%、平均ばらつき誤差 1.32%となった。

変位測定は計算値と比較しても誤差も小さく、また全体のばらつき誤差も小さく測定が行えたと考えられる。

速度測定は、C101 が、測定範囲 0m/s~0.33m/s、平均誤差 2.1%、RayCan が測定範囲 0m/s~0.65m/s、平均誤差 1.7%となった。

速度測定は変位測定に比べると誤差は大きくなった。これは、前述した変位測定には MHP の和の周波数の平均を測定しているのに対して、速度測定には立ち上がりとしち下りの MHP の差の周波数をとっているため、それぞれの測定誤差が合わさり大きな誤差になってしまうためだと考えられるが、それでも平均誤差は最大で 2%ほどに抑えることができた。発振波長の傾きや光出力によって、測定精度が変わってくるので LD の選定に注意する必要がある。

また、今の測定はオシロスコープの FFT モードを利用して目測で測定を行っているため、実際の工場などで使用するには高速測定を行う必要が出てくる。そのため、今後は FPGA などを利用することで高速測定を行えるようにデジタル化を進める必要がある。

## 参考文献

- 1) 朝倉邦造：レーザ応用技術ハンドブック  
1984 年 3 月 10 日発行
- 2) 坂本明紀，津田紀生，山田諄：「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」，電気学会論文誌 C，Vol.126-C，No.12，pp.1454-1459，2006.12
- 3) 名和靖彦，津田紀生，山田諄：「半導体レーザの自己結合効果を用いた微小振動センサ」レーザ研究，Vol. 37， No. 8， pp. 619-623，2009.8

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)